文章编号:1000-4939(2024)06-1269-05

固定翼飞机截面绕流结构着水冲击载荷特性研究

黄淼,吴彬,汪小翔

(中国特种飞行器研究所,448035 荆门)

摘 要:针对水上飞机常用的 V 型和陆基飞机常用的圆柱绕流结构,开展了模型着水载荷试验,对比分析了两种不同截面绕流结构的载荷特性。研究结果表明:V 型绕流结构具有较好的载荷特性,在着水过程中压力峰值变化周期较长、峰值相对较小,峰值作用半周期在 0.1 s 左右,压力位置、速度对峰值影响明显,越靠近对称面位置,着水速度越大压力峰值越大。圆柱形绕流结构具有压力峰值大、作用周期短的特点,同等条件下对称面位置的压力峰值是 V 型绕流结构最大压力的 8.7 倍,峰值作用半周期仅在 0.5 ms 左右。

关键词:固定翼飞机;截面绕流结构;着水;冲击载荷;试验研究

中图分类号:V271.5 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.005

Study on water shock load characteristics of fixed-wing aircraft cross-sectional flow structure

HUANG Miao,WU Bin,WANG Xiaoxiang

(China Special Vehicle Research Institute,448035 Jingmen,China)

Abstract: Aiming at the V-shaped and cylindrical winding structures commonly used in land-based aircraft, the model water load test was carried out, and the load characteristics of two different cross-sectional flow winding structures were compared and analyzed. The results show that the V-shaped flow around structure has good load characteristics, the pressure peak change period is long and the peak value is relatively small during the watering process, the half cycle of the peak is all in 0.1 s, the pressure position and velocity have obvious effects on the peak, which is close to the symmetrical plane position, and the larger the landing speed, the greater the pressure peak. The cylindrical flow around structure has the characteristics of large pressure peak and short action cycle, and the pressure peak at the symmetrical surface position under the same conditions is 8.7 times the maximum pressure of the V-shaped flow structure, and the half cycle is only about 0.5 ms.

Key words: fixed-wing aircraft; structure section; ditching; water load; model test

---

收稿日期:2023-04-24 **修回日期**:2023-06-04
基金项目:工信部民用飞机专项科研资助项目(No. MJZ-3N21-5)
通信作者:黄淼,高级工程师。E-mail:Huangm003@avic.com
引用格式:黄淼,吴彬,汪小翔. 固定翼飞机截面绕流结构着水冲击载荷特性研究[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1269-1273.
HUANG Miao, WU Bin, WANG Xiaoxiang. Study on water shock load characteristics of fixed-wing aircraft cross-sectional flow structure[J]. Chinese journal of applied mechanics,2024,41(6):1269-1273.

陆基飞机的水上迫降和水上飞机的着水过程均属于着水冲击问题,飞机受到的水载荷是该类问题的主要载荷源。水上飞机的机身结构一般为 V 型结构,固定翼飞机的机身结构一般为圆柱绕流结构或近似圆柱绕流结构,该类结构在水上迫降等“硬着水”工况下的着水冲击载荷是结构设计与强度校核的主要载荷源之一。我国民用航空适航规章[1-2]和军用飞机设计规范[3]给出的 V 型结构着水冲击过载和冲击压力分别为

$$n_W = \frac{C_1 V_{s0}^2}{\tan\beta^{2/3} W^{1/3}} \tag{1}$$

$$P_W = \frac{C_2 K_2 V_{s1}^2}{\tan\beta} \tag{2}$$

式中:C、K 均为经验系数;V 为失速速度;W 为飞机质量;β 为线型不同横向位置的切向角。对于圆柱绕流结构,其主要特征是在对称面位置的切线处于水平位置,即该位置线型的切向角为 0,无法按照规章给定的公式计算其着水载荷和压力。

王明振等[4-7]针对水陆两栖飞机船体构型开展了缩比模型试验和数值仿真,对着水过程中的载荷特性和影响因素进行了研究。为掌握圆柱绕流结构着水载荷特性,GRIMALDI 等[8]利用金属材质空腔模型进行了有限元模型仿真,建立了冲击载荷和过载仿真计算方法。VAN 等[9-10]开展了金属材质圆柱体模型着水冲击载荷试验,分析了着水冲击压力随速度的变化规律、分布特性。李正达等[11]利用 LS-DYNA 软件对空投船的着水冲击载荷特性进行了研究,提出了一种着水冲击载荷仿真计算方法。宋嘉佳等[12]在考虑应变率效应的基础上,提出了船体结构在冲击力作用下的动力学响应和结构失效准则。上述研究表明,圆柱绕流结构在着水冲击过程中具有作用时间短、峰值大的特点,利用仿真方法对捕捉高频、高瞬态的冲击过程具有时效特性低、捕捉不够精确的缺点,且对飞行器常用的复合材料薄蒙皮类结构在入水冲击工况下的载荷、压力特性研究较少。据此,本研究开展了 V 型绕流结构和圆柱绕流结构在入水冲击过程中的压力分布、集中载荷影响特性研究,通过分析该类结构在入水过程中的压力、过载时域、频域特性,为进一步研究结构动力学响应特性研究提供支撑。

1 V 型绕流结构着水载荷

依托我国大型灭火/水上救援水陆两栖飞机的研制,开展了典型 V 型绕流结构入水冲击载荷试验研究,试验模型为机身局部舱段模型(图 1),整个舱段试验件长 1 610 mm,宽 3 265 mm,高 2 100 mm,空舱质量为 413 kg,V 型面斜升角为 30°,采用自由落体的方法开展着水冲击试验,模型投放高度为 0.2 m,入水速度为 2 m/s。测试舱段试验件在着水过程中的 V 型面不同位置的压力。在舱段模型 V 型面分别安装 5 个压力传感器,其中 P1 ~ P5 压力传感器占 V 型面半宽的比例分别为 20%、38%、55%、71%、88%。

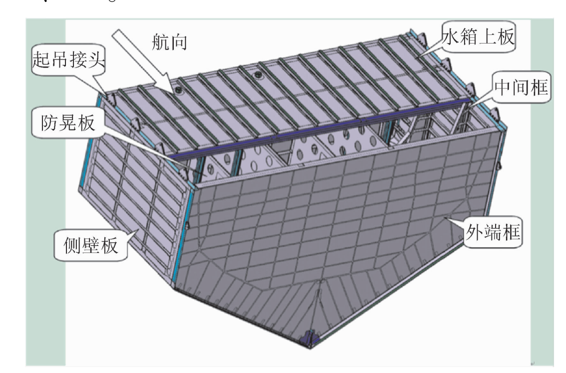


图 1 V 型绕流结构舱段试验件示意图

Fig. 1 V-shaped flow around structure test model

试验在中国特种飞行器高速水动力航空科技重点实验室进行。试验装置包括投放装置、连接系统、采集系统,其中,连接系统上端与投放装置固接,下端通过姿态调节器、投放系统与模型连接,姿态连接器能对模型的俯仰角、滚转角进行调整。投放系统根据需要能够支撑模型,也能在电信号的作用下对模型进行投放。投放后模型自由落体运动,并与水面冲击,通过调整投放前模型的离水距离改变模型的着水速度。试验时,采集不同纵向、横向位置的压力,以及重心位置的加速度的时历曲线。试验过程中的采样率设置为 10 kHz。

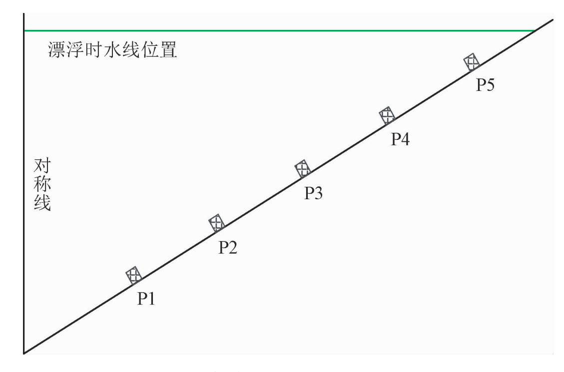


图 2 传感器安装位置示意图

Fig. 2 Installation position of the pressure sensor

试验得到的模型以 2 m/s 入水时的典型压力时

历曲线如图 3 所示。P1 ~ P5 压力传感器分别在 3.52、3.55、3.58、3.60、3.63 s 时达到峰值，峰值压力分别为 11.0、9.8、6.4、4.1、3.4 kPa。从压力响应时间历程来看，从压力传感器接水，到压力达到峰值，再到压力恢复到接水前的值，其半周期约为 0.1 s，换算到压力响应频率为 5 Hz。

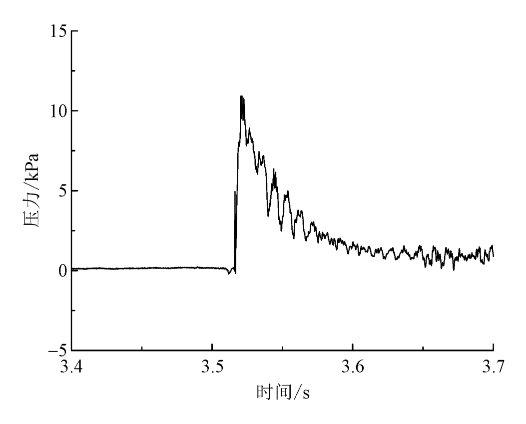


图 3　P1 压力传感器时历曲线

Fig. 3　Time history curve of pressure sensor P1

图 4 所示为舱段结构入水载荷峰值随着水速度的变化曲线。从图中可以看出，载荷峰值随速度增大近似呈抛物线变化，随着着水速度增大，载荷峰值急剧增大。

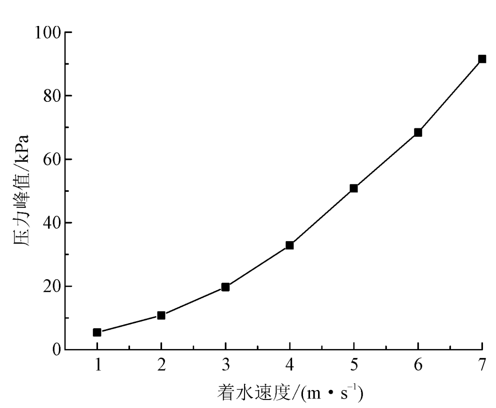


图 4　压力峰值随着水速度变化曲线

Fig. 4　Pressure peak varies with impact velocity

2　圆柱绕流结构着水载荷

建立的圆柱绕流结构直径 200 mm、长 860 mm，蒙皮厚度为 4 mm，如图 5 所示。在长度方向上，圆柱壳体内部设计有 3 个横向加工隔框，隔框材料为 5 mm厚的复合材料板材结构，并在隔框中间采用两根外径 30 mm、内径 27 mm 的碳纤维管作为纵向梁结构，以对模型结构进行加强。

文献［13-15］开展的着水冲击试验，压力传感器的采样频率均为 10 kHz，文中仅给出了采样结果，并未研究采样频率对压力和加速度采集的影响。对于该类高瞬态着水冲击过程，需要足够的数据样本量才能完整地展示压力和过载变化曲线，本研究开展的试验分别使用了 20、50、100 kHz 采样频率进行采集，以分析采样频率对测试结果的影响。

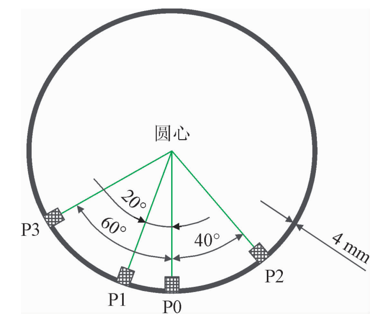


图 5　模型截面及压力传感器安装位置

Fig. 5　Cylindrical shaped model and its pressure sensor

在相同着水速度工况下，P0 压力传感器在不同采样频率时的压力峰值时历曲线如图 6 ~ 8 所示。对比分析可知，由于 P0 传感器在圆柱绕流的对称面上，着水过程中最先接触水且冲击时间短，压力传感器在不足 1 ms 的时间段内达到峰值并回落到原始值。在压力的峰值周期内，采样频率 20 kHz 时，仅采集到 5 个特征点，压力峰值为 138 kPa；采样频率 50 kHz时压力峰值 164 kPa，采集到 12 个特征点；采样频率 100 kHz 时压力峰值 169 kPa，采集到 25 个特征点。

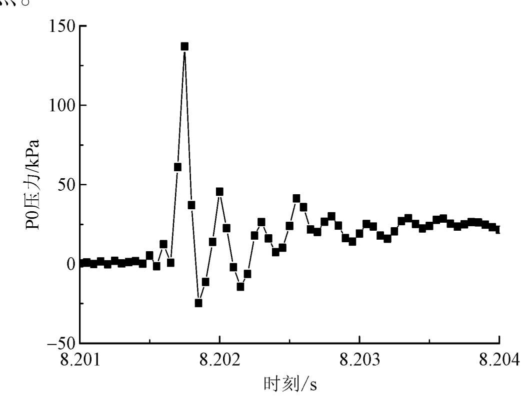


图 6　采样频率 20 kHz 时压力峰值曲线

Fig. 6　Peek pressure curve with sampling rate 20 kHz

分析图 6 ~ 8 可知，采样频率 20 kHz 时，由于冲击时间短，采样特征点不足以描述压力峰值的变化过程，压力峰值也明显比采样频率 50、100 kHz 时的小，采样频率 50、100 kHz 时采样特点在已能较好地描述压力峰值曲线变化特征，且压力峰值仅相差 3%，因此对于圆柱绕流结构入水冲击试验，压力传感器的采样频率至少需要设置为 50 kHz 以上。

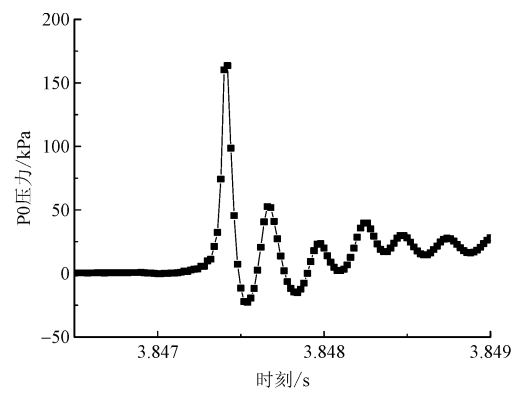


图 7 采样频率 50 kHz 时压力峰值曲线

Fig. 7 Peek pressure curve with sampling rate 50 kHz

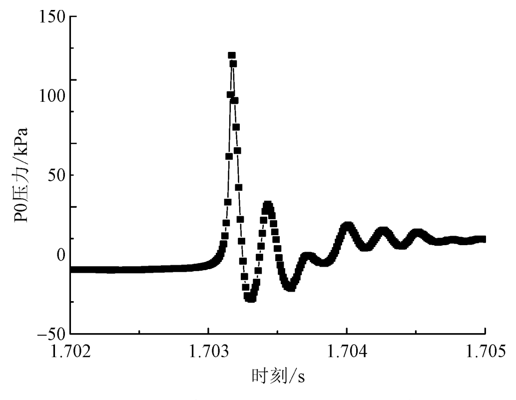


图 8 采样频率 100 kHz 时压力峰值曲线

Fig. 8 Peek pressure curve with sampling rate 100 kHz

图 9 所示为试验模型在着水速度 2 m/s 时 P0 ~ P2 压力传感器变化时历曲线。从图中可以看出，P0 压力传感器在 2.741 s 时刻冲击水面，载荷达到最大值 96 kPa，按照无量纲化压力系数公式[10]

$$C_P = \frac{P_{max}}{0.5\rho V_{impact}^2} \tag{3}$$

式中：C_P 为无量纲化压力系数；P_{max} 为最大冲击压力；V_{impact} 为着水速度；ρ 为水的密度。

可以看出，圆柱绕流结构的最大压力峰值比 V 型绕流结构最大压力增大了 8.7 倍，压力峰值半周期为 0.5 ms，频率为 1 000 Hz。P1 压力传感器在 2.744 s 时刻冲击水面并达到峰值，最大压力 23.8 kPa，压力峰值半周期为 4 ms，频率为 125 Hz。P2 压力传感器在 2.754 s 时刻冲击水面并达到峰值，最大压力 12.3 kPa，压力峰值半周期为 40 ms，频率为 12.5 Hz。

从以上分析可知，对于该类结构，在对称面位置，着水过程冲击时间历程非常短暂，仅在 0.5 ms 左右，峰值压力大。离对称面越远位置，压力峰值的作用周期越长，压力峰值越小，P1 和 P2 压力传感器与 P0 压力传感器相比，压力峰值作用周期分别增大了 8 倍和 80 倍，压力峰值分别减小了 75.2% 和 87.2%。由此可见，该类结构的冲击压力最大值主要发生在对称面附近，因此在结构设计和强度校核时要着重关注对称面位置。

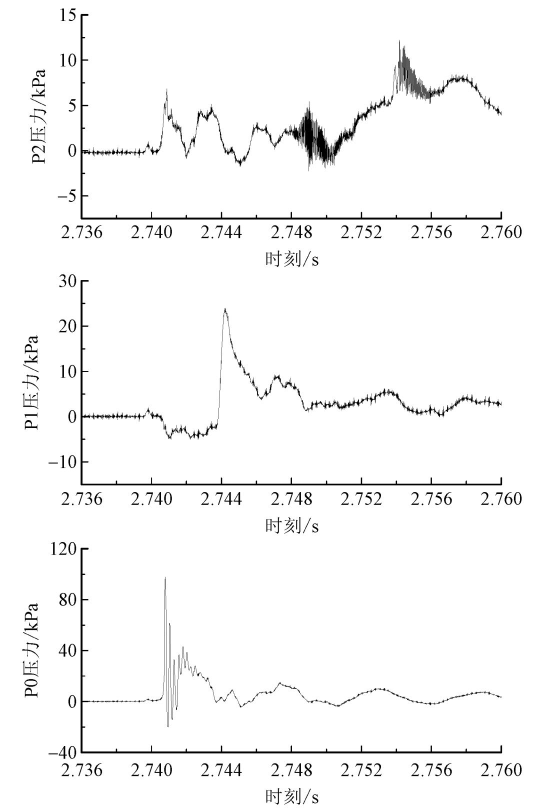


图 9 P0 ~ P2 压力传感器变化时历曲线

Fig. 9 Pressure curve of No. P0 to No. P2

图 10 所示为着水冲击过程中加速度变化时历曲线。与压力变化曲线相比，加速度曲线作用周期明显增大。

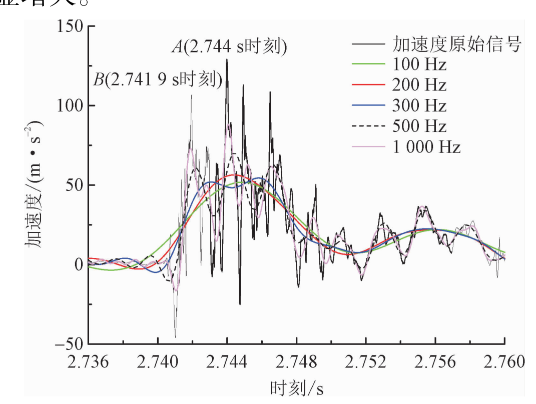


图 10 加速度变化时历曲线

Fig. 10 Acceleration curve varies with time

图中在 A 点和 B 点出现了两个较大的峰值，其中 B 点为 P0 压力传感器着水时刻，此时试验模型仅有对称面附近位置接水，压力峰值大但作用面积小，此时加速度不应出现峰值，因此 B 点的峰值为干扰

信号。对加速度原始曲线进行不同频率滤波后,最大加速度基本在 2.744 s 时刻出现,此时 P1 压力传感触水的时刻,压力峰值大且与水的接触面积也增大。通过分析,在着水过程中最大加速度为 56 m/s^2,加速度峰值变化半周期为 11 ms。

3　结　论

针对固定翼飞机常用的机身横截面绕流结构,开展了模型试验,对 V 型绕流结构和圆柱绕流结构的着水载荷特性分析,得到以下结论。

1)V 型绕流结构压力峰值半周期在 0.1 s 左右,压力峰值随速度增大近似呈抛物线变化,着水速度越大,着水载荷越大。

2)圆柱绕流结构压力峰值作用周期短、压力峰值大,其中对称面位置压力作用周期仅 0.5 ms 左右,同等速度条件下比 V 型结构峰值增大了 8.7 倍。

参考文献:

[1] 中国民用航空总局.正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定:CCAR23-R3[S].北京:中国民用航空总局,2004.

[2] 交通运输部.运输类飞机适航规定:CCAR25-R4[S].北京:交通运输部,2016.

[3] 中国人民解放军总装备部.军用飞机结构强度规范 第 5 部分:水上飞机的水载荷:GJB 67.5A—2008[S].北京:中国人民解放军总装备部,2008.

[4] 王明振,褚林塘,吴彬,等.水陆两栖飞机典型横截面入水撞击实验研究[J].爆炸与冲击,2016,36(3):313-318.
WANG Mingzhen,CHU Lintang,WU Bin,et al. Experimental study on the water impact of a typical cross section for amphibious seaplane[J]. Explosion and shock waves,2016,36(3):313-318(in Chinese).

[5] 褚林塘,孙丰,廉滋鼎,等.水陆两栖飞机船体着水载荷数值与试验分析[J].振动与冲击,2016,35(15):211-215.
CHU Lintang,SUN Feng,LIAN Ziding,et al. Numerical simulation and tests for water load of amphibious aircraft hulls[J]. Journal of vibration and shock,2016,35(15):211-215(in Chinese).

[6] 孙丰,吴彬,廉滋鼎,等.着水姿态对大型水陆两栖飞机着水性能的影响[J].船舶力学,2019,23(4):397-404.
SUN Feng,WU Bin,LIAN Ziding,et al. Influence of pitch angle on water-entry performance of large-scale amphibian aircraft hull[J]. Journal of ship mechanics,2019,23(4):397-404(in Chinese).

[7] 王明振,吴彬,李新颖,等.水陆两栖飞机平静水面着水冲击载荷影响因素分析[J].科学技术与工程,2016,16(12):298-302.
WANG Mingzhen,WU Bin,LI Xinying,et al. An experimental study about impact load of the amphibious aircraft landing on the calm water[J]. Science technology and engineering,2016,16(12):298-302(in Chinese).

[8] GRIMALDI A,BENSON D J,MARULO F,et al. Steel structure impacting onto water:coupled finite element-smoothed-particle-hydrodynamics numerical modeling[J]. Journal of aircraft,2011,48(4):1299-1308.

[9] VAN NUFFEL D,VEPA K S,DE BAERE I,et al. A comparison between the experimental and theoretical impact pressures acting on a horizontal quasi-rigid cylinder during vertical water entry[J]. Ocean engineering,2014,77:42-54.

[10] VAN NUFFEL D,VEPA S,DE BAERE I,et al. Experimental study on the impact loads acting on a horizontal rigid cylinder during vertical water entry[C]//ASME 2012 31st International Conference on Ocean,Offshore and Arctic Engineering. New York,NY,USA:ASME,2012:67-76.

[11] 李正达,郭海军,陈勇,等.舟船空投入水姿态与过载特征分析[J].南京航空航天大学学报,2021,53(2):194-201.
LI Zhengda,GUO Haijun,CHEN Yong,et al. Analysis of entry attitude and overload characteristics of ships in water[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2021,53(2):194-201(in Chinese).

[12] 宋嘉佳,薛鸿祥,唐文勇.考虑应变率效应的船体板格冲击动力响应与结构失效准则研究[J].船舶工程,2014,36(4):83-87.
SONG Jiajia,XUE Hongxiang,TANG Wenyong. Hull panels dynamic response and research on structural failure criteria considering strain rate effect[J]. Ship engineering,2014,36(4):83-87(in Chinese).

[13] XIE H,REN H L,QU S,et al. Numerical and experimental study on hydroelasticity in water-entry problem of a composite ship-hull structure[J]. Composite structures,2018,201:942-957.

[14] YAN F S,ZHANG C X,SUN L P,et al. Experimental study on slamming pressure and hydroelastic vibration of a flat plate during water entry[J]. Journal of coastal research,2015,73(10073):594-599.

[15] 李飞,孙凌玉,张广越,等.圆柱壳结构入水过程的流固耦合仿真与试验[J].北京航空航天大学学报,2007,33(9):1117-1120.
LI Fei,SUN Lingyu,ZHANG Guangyue,et al. Simulation and experiment of cylinder shell structure dropping into water based on fluid structure interaction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007,33(9):1117-1120(in Chinese).

(编辑　吕茵)